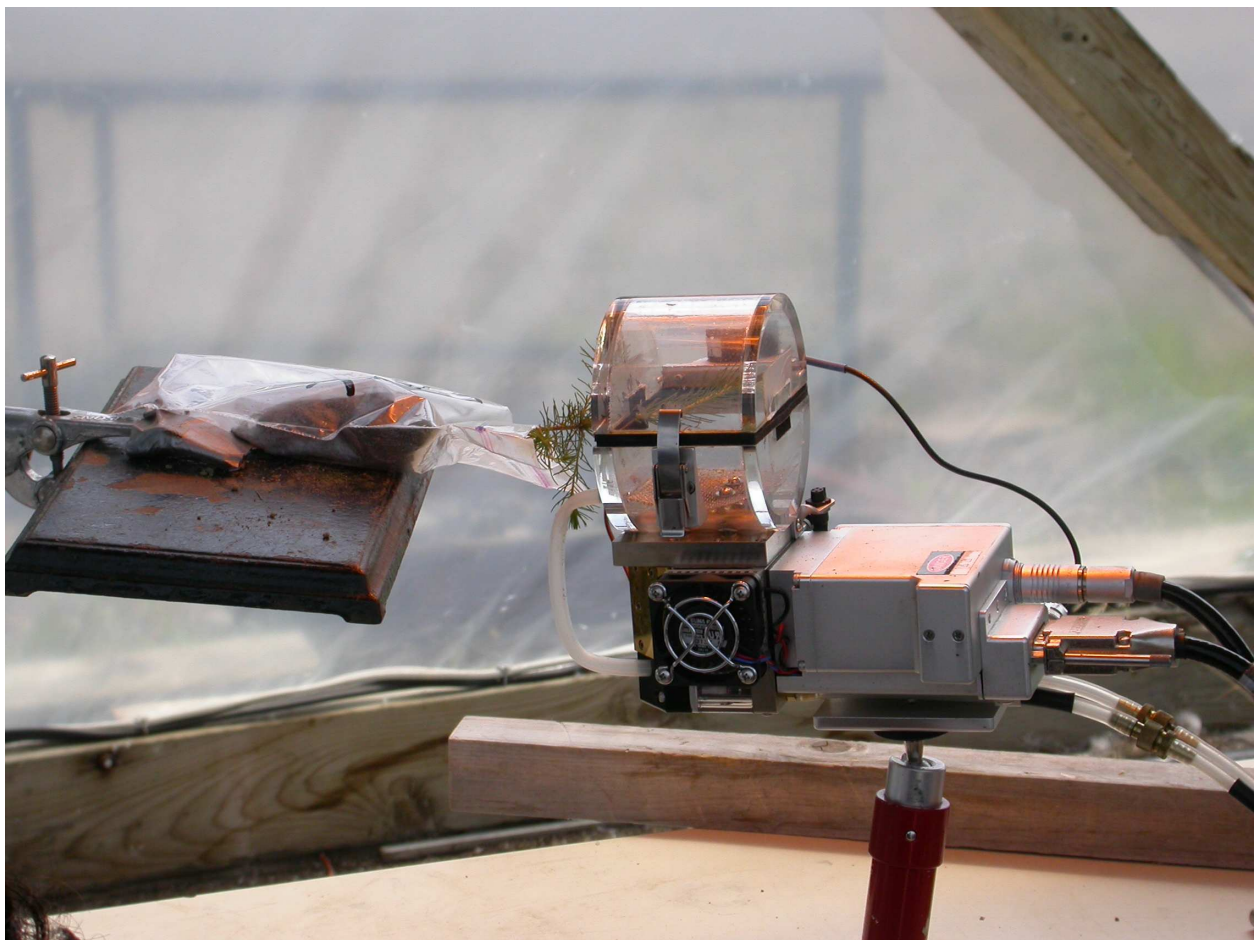


# **EFFET DE LA TAILLE DES SEMIS D'ÉPINETTE NOIRE SUR LA RÉSISTANCE AU STRESS HYDRIQUE**

Par :

Denis Walsh et Daniel Lord



Consortium de  
recherche sur la  
forêt boréale commerciale

**UQAC**  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC  
À CHICOUTIMI

Ce document est disponible en format PDF à l'adresse suivante : <http://dsf.uqac.ca/boreale/>  
© Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, 2012.

Le contenu de ce document peut être reproduit en autant que la source soit mentionnée.

***Correspondance***

Université du Québec à Chicoutimi  
Partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale  
Département des Sciences fondamentales  
a/s Daniel Lord  
555, boul. de l'Université  
Chicoutimi, Québec, G7H 2B1  
Tél. : 418-545-5011, poste 5064; Télécopieur : 418-545-5012  
Courrier électronique : [Daniel\\_Lord@uqac.ca](mailto:Daniel_Lord@uqac.ca)

# **EFFET DE LA TAILLE DES SEMIS D'ÉPINETTE NOIRE SUR LA RÉSISTANCE AU STRESS HYDRIQUE**

**Par :**

**Denis Walsh, M. Sc.**

**et**

**Daniel Lord, Ph. D.**

Université du Québec à Chicoutimi

Département des Sciences fondamentales

555, boulevard de l'Université

Chicoutimi, Québec, Canada

G7H 2B1

Décembre 2012



## REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, direction régionale du Saguenay-Lac-St-Jean. Les auteurs sont redevables en premier lieu à M. Jean-Pierre Girard du MRNF, région 02 dont la collaboration et le support ont été indéfectibles tout au long du projet. Nous adressons aussi des remerciements à Mmes Myriam Bergeron et Solveil Bourque, étudiantes au premier cycle en biologie pour leur participation à la réalisation des différentes étapes du projet. Nous adressons aussi des remerciements à M. François Hébert, Ph. D., chercheur scientifique en sylviculture des plantations au MRNF, Direction de la recherche forestière, qui a révisé le manuscrit et dont les commentaires judicieux ont permis de bonifier cet ouvrage.



## RÉSUMÉ

Le stress hydrique des plants, au moment de la mise en terre, est principalement attribuable au confinement des racines dans la motte de tourbe, limitant la capacité de la plante à répondre à la demande en eau résultant de la transpiration. L'épinette noire est plus sensible au stress hydrique que d'autres conifères de la forêt boréale, en partie à cause de son système racinaire peu profond et par une sensibilité plus grande au déficit de pression de vapeur de l'air. Ce phénomène pourrait être exacerbé dans le cas des plants de très petites dimensions (PTPD) cultivés dans le récipient 113-25. L'objectif de cette étude est d'évaluer la tolérance au stress hydrique des semis d'épinette noire produits en récipients 113-25 comparativement à des plants conventionnels (67-50, 45-110 et PFD) en conditions contrôlées. Des plants d'épinette noire produits dans quatre types de récipient dont la carotte racinaire contient 25, 50, 110 et 350 cc de substrat ont été plantés dans des bacs de sable. Les plants de très petites dimensions (PTPD) des récipients 25 cc sont d'un type nouveau utilisé pour le reboisement de sites nordiques où la végétation de compétition est faible. Leur tolérance à la sécheresse doit être validée pour une utilisation à grande échelle. Une sécheresse a été simulée en stoppant l'arrosage pendant 14 jours dans la moitié des bacs, l'autre moitié (témoin) étant arrosée à tous les 2 jours. Les mesures physiologiques ont montré des différences significatives au niveau des échanges gazeux entre les plants plus petits (25 et 50 cc) et ceux plus grands (110 et 350 cc). Les plants plus petits avaient un  $\psi_{\text{préaube}}$  et  $\psi_{\text{mij-our}}$  moins négatifs que ceux plus grands et un taux de photosynthèse nette ( $P_n$ ) et une conductivité stomatique ( $g_{\text{ve}}$ ) significativement plus élevées. Onze jours après la fin du traitement de stress hydrique, les valeurs de  $P_n$  et  $g_{\text{ve}}$  des plants de 350 cc étaient significativement inférieures aux trois autres types de plants. Les résultats de cette expérience suggèrent que la plantation des PTPD ne semble pas constituer un risque plus grand en cas de sécheresse prolongée par rapport à l'utilisation de plants conventionnels de plus grandes dimensions.

**Mots-clés:** mini-plant, épinette noire, *Picea mariana*, dimension des plants, photosynthèse, stress hydrique, relation hydrique, potentiel hydrique.





## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ.....	v
TABLE DES MATIÈRES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	xi
INTRODUCTION.....	1
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	1
Matériel végétal et conditions de culture.....	1
Potentiel hydrique et échanges gazeux.....	2
Taux relatif de croissance racinaire.....	3
Dispositif expérimental et analyses statistiques.....	3
RÉSULTATS.....	4
Potentiel hydrique.....	4
Échanges gazeux.....	4
Croissance racinaire.....	5
DISCUSSION.....	5
RÉFÉRENCES.....	9



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques initiales des quatre types de plant d'épinette noire (moyenne $\pm$ écart-type, n = 20).....	2
Tableau 2. (A-) Sommaire de l'ANOVA du potentiel hydrique préaube ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ) et du potentiel hydrique à mi-jour ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ). Les contrastes dans J x Tr testent à chaque jour les différences significatives entre les deux traitements et deuxièmement en (B), les contrastes testent les différences entre les différents types de plant uniquement pour les jours où le traitement témoin était significativement différent du traitement stress.....	4
Tableau 3. (A-) Sommaire de l'ANOVA de la photosynthèse nette et de la conductance stomatique à la vapeur d'eau. Les contrastes dans J x Tr testent à chaque jour les différences significatives entre les deux traitements et deuxièmement en (B), les contrastes testent les différences entre les différents types de plant uniquement pour les jours où le traitement témoin était significativement différent du traitement stress.....	6
Tableau 4. Sommaire de l'ANOVA de la photosynthèse nette et de la conductance stomatique à la vapeur d'eau pour les mesures avant le traitement de stress hydrique (jour 0) et 11 jours après la fin du stress hydrique.....	7
Tableau 5. Sommaire de l'ANOVA de la biomasse sèche des racines. Les données ont été transformées en Log naturel.....	8



## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Calendrier de production des différents types de plant utilisés dans l'expérience.....	1
Figure 2. Sommaire des conditions environnementales dans le tunnel durant l'expérience: (A) contenu en eau du sol; (B) températures minimale et maximale de l'air; (C) humidité relative minimale et maximale de l'air. Les parcelles traitées n'ont pas été arrosées entre les jours 0 et 14.....	3
Figures 3. Moyennes du potentiel hydrique préaube ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ) et à mi-jour ( $\Psi_{\text{mi-jour}}$ ) des quatre types de plant qui n'ont pas été arrosés entre les jours 0 et 14 (A-C) ainsi que des plants témoins arrosés à tous les deux jours (B-D); $n = 5$ . Les barres noires indiquent la période où les plants stressés n'ont pas été arrosés.....	5
Figures 4. (A-B) Moyennes de la photosynthèse nette (A-B) et de la conductance stomatique à la vapeur d'eau (C-D) des quatre types de plant qui n'ont pas été arrosés entre les jours 0 et 14 (Stress) ainsi que des plants témoins arrosés à tous les deux jours; $n = 5$ . Les barres noires indiquent la période où les plants stressés n'ont pas été arrosés.....	7
Figures 5. Moyennes de la photosynthèse nette (A) et de la conductance stomatique à la vapeur d'eau (B) des quatre types de plant mesurés avant le stress hydrique (■) et 11 jours après celui-ci (□). Les traits verticaux indiquent l'intervalle de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes sont significativement différentes à $P \leq 0,05$ d'après le test de T de Student; $n = 5$ .....	8
Figures 6. Croissance de la biomasse racinaire (transformation en Ln) des quatre types de plant témoin pendant les 25 jours de l'expérience.....	8



## INTRODUCTION

Ces dernières années les chercheurs de l'UQAC ont développé, en collaboration avec le MRNF-02 et les Centres régionaux de production de plants forestiers, des régies de production pour des plants cultivés dans des récipients de petites dimensions dont chacune des 126 alvéoles a un volume de 25 cc (Hébert et al. 2005). Les essais préliminaires en plantation ont montré que le taux de survie et la croissance de ces plants de petites dimensions (PPD) pouvaient rivaliser avec ceux produits en récipient 67-50, au moins là où la concurrence végétale est faible ou absente (Walsh et al. 2011). Ces travaux ont permis le développement d'un nouveau récipient amélioré, le 113-25. Dans la région 02 (Saguenay Lac-St-Jean), 86,9 millions de plants d'épinette noire produits en récipients 126-25 ou 113-25 ont déjà été mis en terre depuis 2003 (Audrey Murray, MRNF, communication personnelle).

La stagnation des plantations («growth check»), qui survient généralement dans les deux années suivant la plantation pour l'épinette, est attribuable à la fertilité limitée du site, au stress hydrique ou aux dommages causés par le gel (Grossnickle 2000). Le stress hydrique des plants, au moment de la mise en terre, est principalement attribuable au confinement des racines dans la motte de tourbe, limitant la capacité de la plante à répondre à la demande en eau résultant de la transpiration (Grossnickle et Folk 1993). Un plant dont la croissance est rapide s'acclimatera plus rapidement puisque la croissance du système racinaire permettra un meilleur contact sol-plant, réduisant le stress hydrique. L'épinette noire est plus sensible au stress hydrique que d'autres conifères de la forêt boréale, en partie à cause de son système racinaire peu profond et par une sensibilité plus grande au déficit de pression de vapeur de l'air (Grossnickle et Blake 1986; Lamhamedi et Bernier 1994, Hébert et al. 2006).

Les relations entre la taille des plants d'épinette au moment

de la plantation et les réponses physiologiques induites par les stress hydriques a été étudiée au Québec sur des plants de plus fortes dimensions, soit les plants produits en récipients 45-110 et les PFD (Jobidon et al. 1998; Lamhamedi et al. 1998). Très peu de travaux de recherche ont été publiés sur l'utilisation de récipient dont le volume des cavités est inférieur à 50 cc. À notre connaissance, il n'existe présentement pas d'étude sur la résistance au stress hydrique des plants d'épinette noire produits dans des récipients dont les cavités ont moins de 50 cc de volume. Le faible volume de la motte entourant les racines de même que la faible profondeur du système racinaire pourrait laisser croire que ce type de plants forestiers serait moins tolérant à la sécheresse.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la tolérance au stress hydrique des semis d'épinette noire produits en récipients 113-25 comparativement à des plants conventionnels (67-50, 45-110 et PFD) lors de la première année de plantation en conditions contrôlées.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Matériel végétal et conditions de culture

Nous avons testé quatre types de lots d'épinette noire, issus de graines fournies par le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF), qui ont été cultivés chez un producteur privé (Pépinière Boucher, St-Ambroise, Qc.) dans quatre types de récipients, soit : 113-25, 67-50, 45-110 et 25-350A, et qui ont passé des tests de conformité du Ministère à la fin de la production, juste avant la livraison pour la plantation. Les conditions de culture pour chaque lot sont présentées à la figure 1. Dans chaque lot, 20 semis ont été échantillonnés aléatoirement pour mesurer leurs caractéristiques morphologiques (Tableau 1).

Le 24 juillet 2007, les semis ont été transplantés dans des bacs (45 cm x 94 cm x 14 cm) remplis d'un sable grossier (moins de 1% limon). Les semis étaient plantés pour former 10 rangées de huit plants comprenant deux exemplaires

Figure 1. Calendrier de production des quatre types de plants utilisés dans cette expérience.

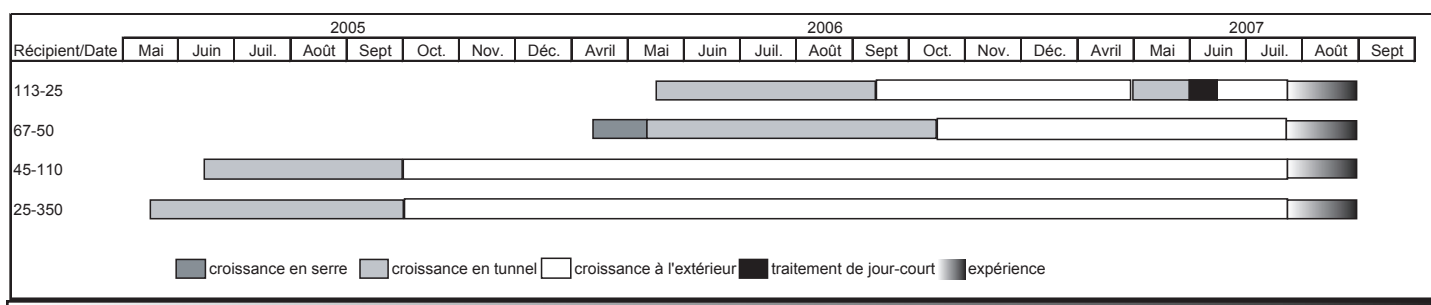


Tableau 1. Caractéristiques initiales des quatre types de plant d'épinette noire (moyenne  $\pm$  écart-type; n = 20).

	PPD	Petit	Moyen	Grand
Type de récipient	IPL 113-25	IPL 67-50	IPL 45-110	IPL 25-350A
Code de culture	B003EPN06-B84	B005EPN06-H64	B011EPN05-B88	B035EPN05-B90
Volume de la cavité (cm <sup>3</sup> )	25	50	110	350
Hauteur de la cavité (cm)	7,5	8	12	12,5
Hauteur (cm)	12,82 $\pm$ 1,04	20,28 $\pm$ 2,53	31,81 $\pm$ 3,77	71,32 $\pm$ 4,38
Diamètre (mm)	1,90 $\pm$ 0,16	2,54 $\pm$ 0,20	3,71 $\pm$ 0,71	8,18 $\pm$ 0,68
H/D (cm/mm)	6,80 $\pm$ 0,85	8,01 $\pm$ 1,10	8,80 $\pm$ 1,57	8,76 $\pm$ 0,84
Biomasses sèches (g)				
Aiguilles (g)	0,23 $\pm$ 0,05	0,53 $\pm$ 0,11	1,27 $\pm$ 0,34	7,02 $\pm$ 1,70
Tige et branches (g)	0,19 $\pm$ 0,05	0,39 $\pm$ 0,09	0,95 $\pm$ 0,28	9,40 $\pm$ 1,59
Racines (g)	0,22 $\pm$ 0,06	0,49 $\pm$ 0,12	0,93 $\pm$ 0,35	6,67 $\pm$ 1,89
Total (g)	0,64 $\pm$ 0,14	1,41 $\pm$ 0,28	3,14 $\pm$ 0,88	23,09 $\pm$ 4,28
Aérien/Racines (g/g)	1,90 $\pm$ 0,31	1,91 $\pm$ 0,35	2,56 $\pm$ 0,63	2,61 $\pm$ 0,70
Densité racinaire (cc.cc <sup>-1</sup> )	2,56 $\pm$ 1,40	6,60 $\pm$ 2,45	4,24 $\pm$ 1,00	7,0 $\pm$ 3,63

de chaque type de lot placés aléatoirement dans chaque rangée. Une rangée de plants produits en récipient 67-50 ont été plantés pour former une bordure autour des bacs. Au total, 10 bacs ont été utilisés formant cinq rangées de deux bacs, un servant de témoin et l'autre recevant le traitement de stress hydrique; la répartition des traitements a été faite aléatoirement dans chaque bloc de deux traitements. Les bacs ont été fertilisés hebdomadairement durant les deux premières semaines de l'acclimatation, chacun recevant 10 g de N-P-K (20-20-20 Plant Products Ltd, Brampton, Ont., Canada). Les bacs étaient situés dans un tunnel recouvert d'un plastique de polyéthylène transparent équipé d'une ventilation forcée (consigne de ventilation à 25°C). Tous les bacs ont été arrosés à tous les deux jours pour maintenir une teneur en eau en moyenne de 7% (v/v). La mesure de la teneur en eau du sol ( $\theta_v$ ) était réalisée quotidiennement dans chaque bac à l'aide d'une sonde TDR modèle MP-917 (E.S.I. Environmental Sensors Inc., Victoria, B.C., Can.). Le traitement de stress hydrique a débuté le 6 août, les cinq bacs faisant partie de ce traitement n'ont pas été arrosés pendant 14 jours tandis que les bacs témoins étaient arrosés à tous les deux jours ( $6 \leq \theta_v \leq 8 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Après cette période (20 août), les bacs du traitement stress hydrique ont été arrosés comme les bacs témoin pendant une semaine supplémentaire. La teneur en eau du sol des bacs témoins a été maintenue en moyenne autour de  $8 \pm 2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Fig. 2). Dans les bacs du traitement de stress hydrique, la teneur en eau du sol a diminué graduellement à partir de l'arrêt complet des arrosages pour atteindre  $1,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  au jour 7 et se maintenir sous ce seuil jusqu'au jour 14. Les arrosages ont repris après cette date et les plants ont été acclimatés jusqu'au 6 août.

Les paramètres environnementaux ont été enregistrés continuellement durant la durée de l'expérience. La température et l'humidité relative (min/max) étaient notées tous les jours à l'aide de deux thermomètre-humidimètre (Fisher Scientific) placés directement sur le sable et qui enregistraient les valeurs maximales et minimales de la journée. Les valeurs moyennes sont présentées à la figure 2.

### Potentiel hydrique et échanges gazeux

Les mesures physiologiques ont été réalisées à sept reprises durant la période de stress hydrique (jour 0, 2, 4, 7, 9, 11 et 14) ainsi qu'à deux reprises après la réhydratation des bacs du traitement stress hydrique, soit 21 et 25 jours après le début de l'expérience. À chaque date d'échantillonnage, un semis de chaque lot par ligne d'échantillonnage était sélectionné aléatoirement pour les mesures du potentiel hydrique préaube ( $\psi_{pa}$ ), tandis qu'un autre semis pour chaque lot était choisi pour les mesures subséquentes du potentiel hydrique mi-jour ( $\psi_{mj}$ ) et des mesures des échanges gazeux. La récolte et les mesures du potentiel hydrique suivent la description faite dans Hébert et al. (2006). Le  $\psi_{pa}$  des quarante échantillons était mesuré en une heure environ à l'aide d'une chambre à pression (PMS Instruments Co., Corvallis, OR, USA) (Scholander et al. 1965). Le  $\psi_{mj}$  de même que les mesures des échanges gazeux ont été réalisés la même journée entre 09:00 et 11:00 h. Les plants d'un des bacs étaient déterrés et le système racinaire était placé immédiatement dans un sac de plastique. La photosynthèse nette ( $P_n$ ) et la conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) ont été mesurées sans



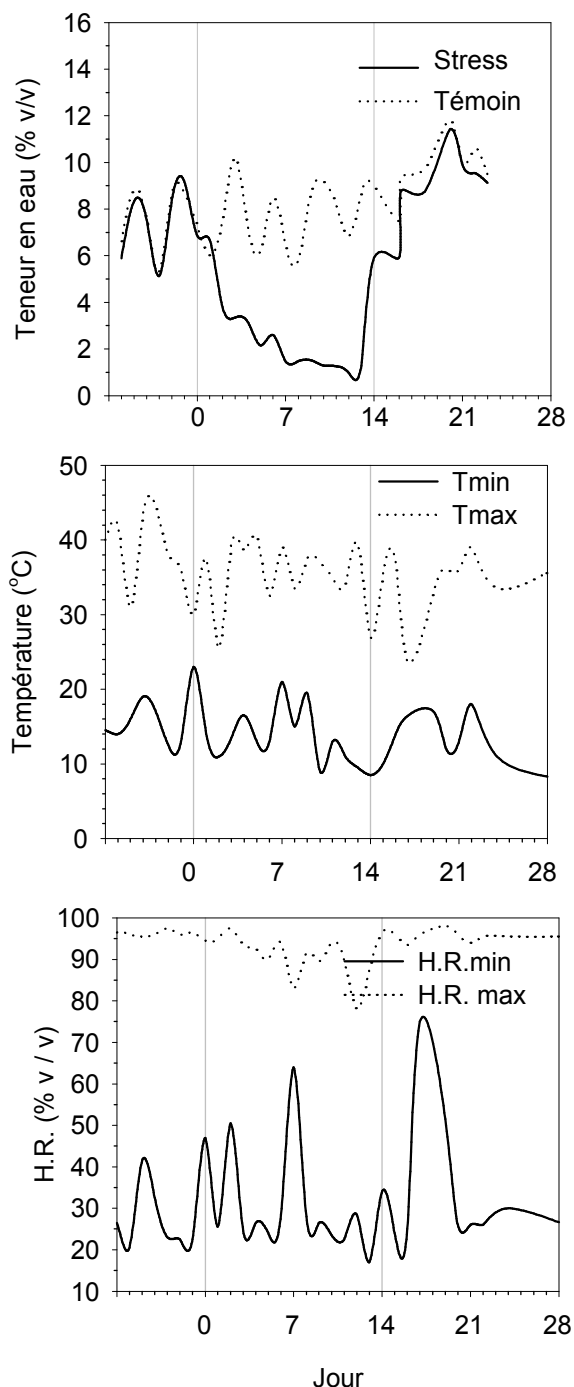


Figure 2. Sommaire des conditions environnementales dans le tunnel durant l'expérience: (A) contenu en eau du sol; (B) températures minimale et maximale de l'air; (C) humidités relatives minimale et maximale de l'air. Les parcelles traitées n'ont pas été arrosées entre les jours 0 et 14.

délai sur la pousse apicale à l'aide d'un appareil portatif de mesure de photosynthèse LI-6400 (LI-COR Inc., Lincoln, NB, USA.) équipé d'une chambre de 0,25 L adaptée aux conifères. Les mesures ont été réalisées sous une lampe à vapeur de sodium haute pression fournissant un minimum de  $1\,200\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{sec}^{-1}$  PAR au dessus de la chambre. Les conditions à l'intérieur de la chambre étaient de 400 ppm  $\text{CO}_2$  et d'environ  $25^\circ\text{C}$ . À la fin de ces mesures, le  $\psi_{\text{mj}}$  était

mesuré sans délai sur le même échantillon avec la chambre à pression. L'échantillon était ensuite séché à  $65^\circ\text{C}$  pendant 48 heures pour mesurer la biomasse foliaire incluse dans la chambre. Tous les paramètres des échanges gazeux ont été calculés sur la base de la masse sèche des aiguilles.

### Taux relatif de croissance racinaire

À chaque date d'échantillonnage, après les mesures physiologiques, la motte de tourbe contenant le système racinaire a été conservée au réfrigérateur ( $4^\circ\text{C}$ ) jusqu'au moment des mesures du taux relatif de la croissance racinaire (TRC). Les biomasses racinaires ont été transformées en logarithme naturel. Une interaction significative entre le temps et la biomasse transformée de chaque lot de plants indique que le taux relatif de croissance de la biomasse sèche varie en fonction du type de lot de plants (Poorter et Lewis 1986). Graphiquement, la pente des droites du log naturel de la biomasse racinaire en fonction du temps correspond au TRC et une interaction significative entre le temps et le type de plants signifie que le TRC varie significativement entre les types de plants.

### Dispositif expérimental et analyses statistiques

Les données de l'expérience ont été analysées comme un dispositif en bloc en sous-parcelles subdivisées. Chaque bloc était composé de deux régimes hydriques, le témoin irrigué et le stress hydrique. Chaque bac de culture représentait une parcelle principale formée de neuf sous-parcelles correspondant aux dates d'échantillonnage, les quatre types de plant étant en sous-sous-parcelles. Au total, on retrouvait 5 blocs x 2 régimes hydriques x 9 dates d'échantillonnage x 4 types de semis = 360 plants pour les mesures du  $\psi_{\text{pa}}$  et le même nombre pour le  $\psi_{\text{mj}}$  et les mesures d'échanges gazeux. Les moyennes des variables physiologiques ont été comparées par l'analyse de variance (ANOVA) en utilisant la procédure REML du logiciel JMP 7.0 (SAS Institute Inc, 2007). L'homogénéité des variances a été vérifiée graphiquement en évaluant la distribution des valeurs résiduelles du modèle linéaire en fonction des valeurs estimées (Montgomery, 1991). La procédure SLICE a été appliquée à l'interaction Date x Traitement en vue de déterminer à quelles dates les régimes hydriques étaient significativement différents. L'interaction Date x Traitement x Lot était analysée à l'aide de contrastes orthogonaux entre les lots de plants pour chaque date où l'interaction Date x Traitement était significative (Kirk, 1982).

## RÉSULTATS

### Potentiel hydrique

En général, le stress hydrique a induit une diminution significative du  $\psi_{\text{préaube}}$  ( $P = 0,0445$ ) et du  $\psi_{\text{mijour}}$  ( $P = 0,0085$ ) chez tous les types de plants (tableau 2, figure 3). Cette diminution n'était significative qu'à partir du 7<sup>ème</sup> jour après l'arrêt des arrosages ( $P < 0,0001$ ) et ces différences ont persisté jusqu'à la fin de la période de sécheresse (jour 14). Cependant, les interactions Tr x R et J x Tr x R étant significatives pour  $\psi_{\text{préaube}}$  et  $\psi_{\text{mijour}}$  ( $P < 0,01$ ), la réponse au stress hydrique variait en fonction de la taille des semis. Les

Tableau 2. (A-) Sommaire de l'ANOVA du potentiel hydrique préaube ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ) et du potentiel hydrique à mi-jour ( $\Psi_{\text{mijour}}$ ). Les contrastes dans J x Tr testent à chaque jour les différences significatives entre les deux traitements et deuxièmement en (B), les contrastes testent les différences entre les différents types de plant uniquement pour les jours où le traitement témoin était significativement différent du traitement stress.

Source	d.l. num.	d.l. dén.	$\Psi_{\text{préaube}}$		$\Psi_{\text{mijour}}$	
			F	Prob > F	F	Prob > F
Bloc (B)	4	4				
Trait. (Tr)	1	4	8,36	<b>0,0445</b>	23,28	<b>0,0085</b>
Jour (J)	8	64	17,25	<b>&lt;0,0001</b>	23,14	<b>&lt;0,0001</b>
J x Tr	8	64	11,54	<b>&lt;0,0001</b>	20,31	<b>&lt;0,0001</b>
$J_0 \times Tr$	1	64	0,01	0,9434	0,32	0,5716
$J_2 \times Tr$	1	64	0,03	0,8646	0,05	0,8299
$J_4 \times Tr$	1	64	0,06	0,8092	3,77	0,0567
$J_7 \times Tr$	1	64	2,24	0,1392	17,11	<b>0,0001</b>
$J_9 \times Tr$	1	64	8,05	<b>0,0006</b>	10,09	<b>0,0023</b>
$J_{11} \times Tr$	1	64	25,78	<b>&lt;0,0001</b>	36,94	<b>&lt;0,0001</b>
$J_{14} \times Tr$	1	64	55,21	<b>&lt;0,0001</b>	124,02	<b>&lt;0,0001</b>
$J_{21} \times Tr$	1	64	0,73	0,9321	0,24	0,6257
$J_{24} \times Tr$	1	64	0,07	0,7982	1,08	0,3026
Réc. (R)	3	216	1,80	0,1479	8,29	<b>&lt;0,0001</b>
Tr x R	3	216	14,92	<b>&lt;0,0001</b>	3,66	<b>0,0132</b>
J x R	24	216	3,02	<b>&lt;0,0001</b>	1,14	0,3053
J x Tr x R	24	216	2,79	<b>&lt;0,0001</b>	2,20	<b>0,0016</b>

B-) Valeurs de P des contrastes entre les types de plant du traitement stress hydrique uniquement pour les jours où le traitement témoin est significativement différent du traitement stress hydrique.

	$\Psi_{\text{préaube}}$				$\Psi_{\text{mijour}}$			
	Jour 7	Jour 9	Jour 11	Jour 14	Jour 7	Jour 9	Jour 11	Jour 14
Petit vs grand	<b>0,0051</b>	0,5417	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>0,0003</b>	0,1884	<b>0,0020</b>	<b>0,0013</b>
113 vs 67	0,5863	<b>0,0469</b>	0,1744	0,9277	0,7234	0,0526	0,7907	0,1335
45 vs 25	<b>0,0023</b>	<b>0,0090</b>	<b>&lt;0,0001</b>	0,1240	0,7234	0,0525	0,0938	0,9295

plants les plus petits (113-25 et 67-50) avaient un  $\psi_{\text{préaube}}$  et  $\psi_{\text{mijour}}$  plus élevé que les plants plus gros (45-110 et 25-350A; tableau 2B). De même, le  $\psi_{\text{préaube}}$  des plants 25-110 était significativement plus bas ( $P < 0,01$ ) que celui des 45-110 (Tableau 2B). Suite à l'arrosage des bacs du traitement de sécheresse après le jour 14, le  $\psi_{\text{préaube}}$  et  $\psi_{\text{mijour}}$  des plants qui avaient été stressés n'étaient plus différents des valeurs des plants témoins au jour 21 et 24 de l'expérience.

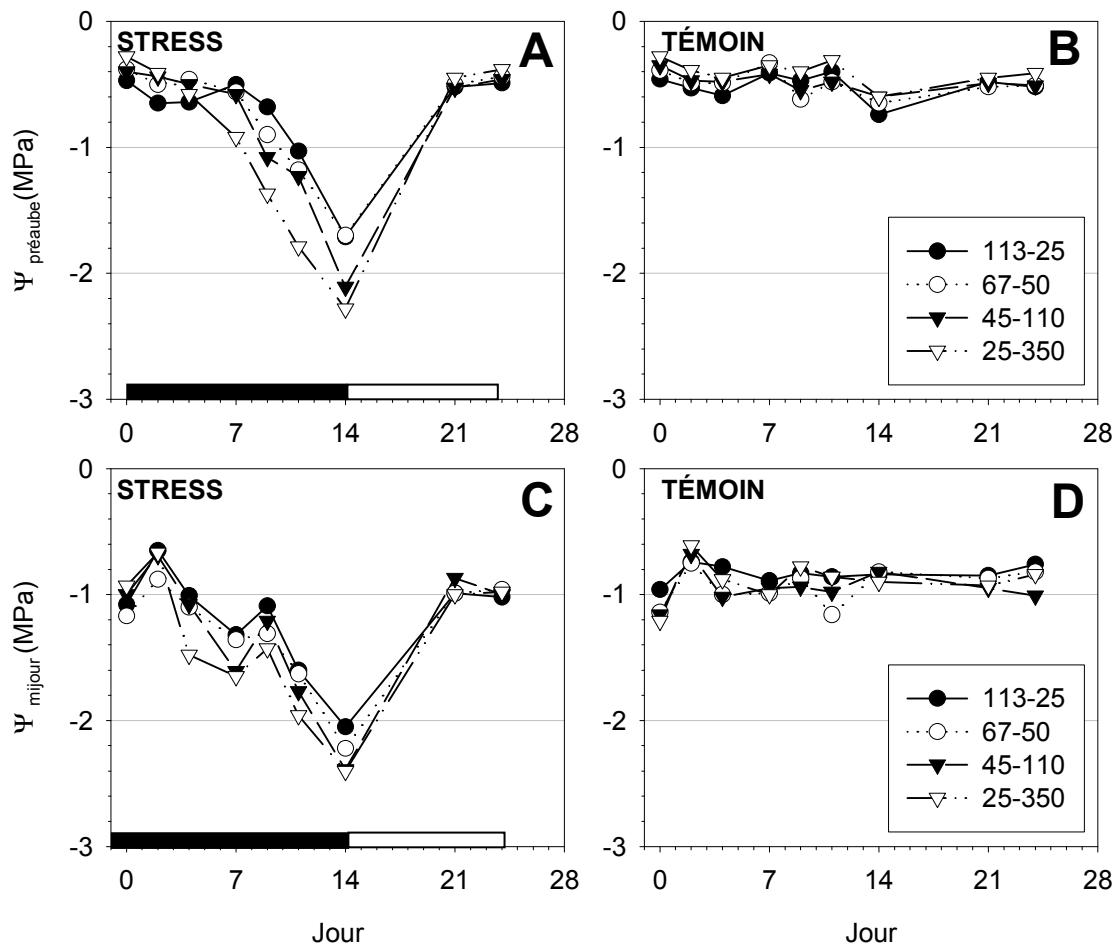
### Échanges gazeux

En général, le stress hydrique a induit une diminution significative de  $P_n$  et  $g_{ve}$  ( $P < 0,02$ ; tableau 3, figures 4A, 4B). Les valeurs de  $P_n$  des plants stressés étaient significativement plus faibles que les témoins aux jours 7,

11 et 14 de l'expérience ( $P < 0,0001$ , tableau 3). Cependant, l'interaction J x R étant significative, la réaction à la sécheresse variait donc en fonction du type de plant. Après 7 jours de sécheresse, les valeurs de  $P_n$  des 113-25 et des 67-50 étaient significativement plus élevées ( $P < 0,0001$ ) que celui des 45-110 et 25-350A et celui du 45-110 plus élevé que celui du 25-350A ( $P = 0,0042$ ). Après 11 jours de sécheresse, les quatre types de plants avaient des valeurs de  $P_n$  semblables mais significativement plus basses que celui des plants témoins, soit  $0,02 \mu\text{mole.g}^{-1}.\text{sec}^{-1}$  comparativement à  $0,08 \mu\text{mole.g}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ . Par contre, à la fin du traitement de sécheresse (jour 14), les valeurs de  $P_n$  des 113-25 étaient significativement plus élevées ( $P < 0,03$ ) que celui des autres types de plants.

La sécheresse a eu un effet encore plus marqué sur  $g_{ve}$  puisque cette valeur demeurerait significativement plus faible comparativement aux témoins entre les jours 4 et 14 du traitement (Tableau 3A, figures 4C, 4D). Les valeurs de la transpiration ( $E$ ) suivaient les mêmes tendances que celles de  $g_{ve}$  et ne sont donc pas présentées.

Les valeurs de  $g_{ve}$  des 113-25 sont demeurées significativement plus élevées par rapport aux autres plants tandis qu'à l'opposé les valeurs de  $g_{ve}$  des 23-350 étaient



Figures 3. Moyenne du potentiel hydrique préaube ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ) et à mi-jour ( $\Psi_{\text{mi-jour}}$ ) des quatre types de plant qui n'ont pas été arrosés entre les jours 0 et 14 (A-C) ainsi que des plants témoins arrosés à tous les deux jours (B-D);  $n = 5$ . Les barres noires indiquent la période où les plants stressés n'ont pas été arrosés.

significativement plus faibles la majorité du temps.

La figure 5 compare les valeurs de  $P_n$  et de  $g_{ve}$  avant le stress (jour 0) et après 11 jours de récupération (jour 25). Les valeurs de  $P_n$  des quatre types de plants après le stress ne différaient pas significativement de celles avant la sécheresse. Les valeurs de  $P_n$  des 25-350A étaient par contre significativement plus faibles que les trois autres types de plants. Les valeurs de  $g_{ve}$  des 113-25 ont diminué significativement suite au stress hydrique (Figure 5B). Comme précédemment, les valeurs de  $g_{ve}$  des 25-350A étaient nettement plus faibles que celles des trois autres types de plants.

#### Croissance racinaire

La biomasse sèche des racines a varié significativement au cours de l'expérience et entre les types de plants. L'absence d'interaction significative  $J \times R$  nous indique que les taux relatif de croissance de la biomasse racinaire étaient

pratiquement la même entre les quatre type de plants (Figure 6). Le rapport biomasse aérienne/racinaire est nettement plus faible chez les 113-25 et 67-50 comparativement aux 45-110 et 23-350.

#### DISCUSSION

Les deux régimes d'irrigation ont permis de créer des conditions hydriques contrastantes entre les bacs en conditions de stress hydrique et les bacs témoins même que le niveau de stress (1 %) fut plus important que celui du traitement xérique de [Lamhamedi et al. \(1997\)](#) qui était de 2,5%. Le sol utilisé dans notre expérience est un sable très grossier. Ce type de substrat a une capacité d'emmagasiner très faible et s'assèche très rapidement en surface; sa faible conductivité hydraulique empêche la migration de l'eau située plus profondément ([Grossnickle, 2005](#)). Comme conséquence, la résistance au mouvement de l'eau à travers le sol et son absorption par la plante augmente avec

Tableau 3. (A-) Sommaire de l'ANOVA de la photosynthèse nette et de la conductance stomatique à la vapeur d'eau. Les contrastes dans J x Tr testent à chaque jour les différences significatives entre les deux traitements et deuxièmement en (B), les contrastes testent les différences entre les différents types de plant uniquement pour les jours où le traitement témoin était significativement différent du traitement stress.

Source	d.l. num.	d.l. dén.	Photosynthèse		Conductance	
			F	Prob > F	F	Prob > F
Bloc	4	4				
Trait. (Tr)	1	4	12,98	<b>0,0227</b>	50,42	<b>0,0021</b>
Jour (J)	8	64	24,59	<b>&lt;0,0001</b>	64,37	<b>&lt;0,0001</b>
J x Tr	8	64	7,87	<b>&lt;0,0001</b>	9,54	<b>&lt;0,0001</b>
<i>J<sub>0</sub> x Tr</i>	1	64	0,24	0,6249	0,01	0,9412
<i>J<sub>2</sub> x Tr</i>	1	64	0,00	0,9534	1,07	0,3057
<i>J<sub>4</sub> x Tr</i>	1	64	1,90	0,1725	8,97	<b>0,0039</b>
<i>J<sub>7</sub> x Tr</i>	1	64	22,74	<b>&lt;0,0001</b>	57,99	<b>&lt;0,0001</b>
<i>J<sub>9</sub> x Tr</i>	1	64	3,71	0,0584	54,16	<b>&lt;0,0001</b>
<i>J<sub>11</sub> x Tr</i>	1	64	30,98	<b>&lt;0,0001</b>	19,05	<b>&lt;0,0001</b>
<i>J<sub>14</sub> x Tr</i>	1	64	29,16	<b>&lt;0,0001</b>	34,22	<b>&lt;0,0001</b>
<i>J<sub>21</sub> x Tr</i>	1	64	0,23	0,6273	1,69	0,1987
<i>J<sub>24</sub> x Tr</i>	1	64	0,12	0,7251	3,62	0,0616
Réc. (R)	3	215	144,67	<b>&lt;0,0001</b>	198,34	<b>&lt;0,0001</b>
Tr x R	3	215	1,68	0,1714	8,84	<b>&lt;0,0001</b>
J x R	24	215	4,76	<b>&lt;0,0001</b>	7,19	<b>&lt;0,0001</b>
J x Tr x R	24	215	1,34	0,1385	1,85	<b>0,0116</b>

B-) Valeurs de P des contrastes entre les types de plant du traitement stress hydrique uniquement les jours où le traitement témoin était significativement différent du traitement stress hydrique.

Contrastes	Jour 2	Jour 4	Jour 7	Jour 9	Jour 11	Jour 14
<b>Photosynthèse</b>						
Petit vs grand	-	-	<b>&lt;0,0001</b>	-	0,1078	<b>0,0025</b>
113 vs 67	-	-	0,7276	-	0,5334	<b>0,0319</b>
45 vs 25	-	-	<b>0,0042</b>	-	0,7615	0,9917
<b>Conductance</b>						
Petit vs grand	-	<b>&lt;0,0001</b>	<b>0,0029</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	0,7499
113 vs 67	-	0,3054	0,8772	0,2361	0,7730	0,8861
45 vs 25	-	0,0543	0,2253	<b>0,0108</b>	0,1168	0,6001

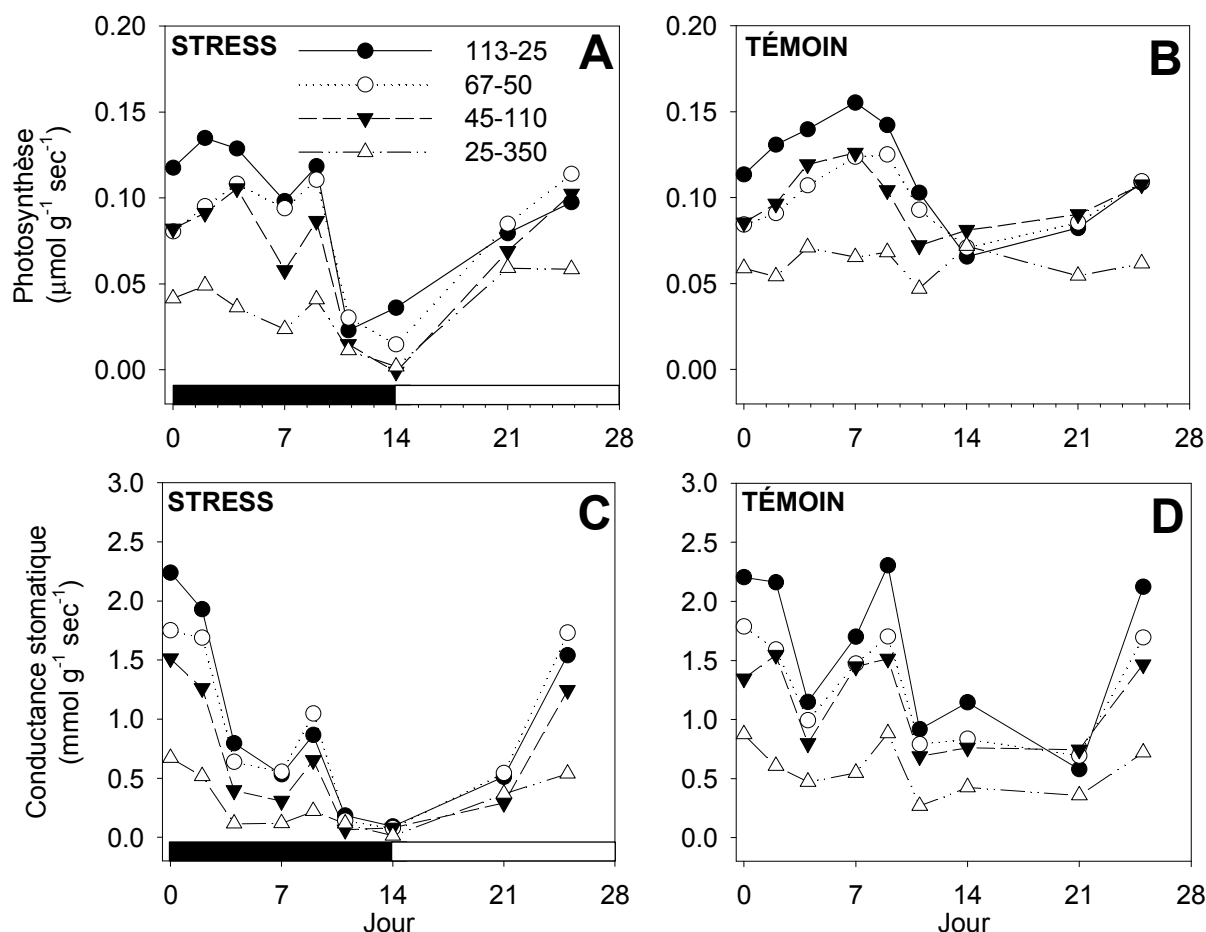
la texture grossière du sol (Dosskey et Ballard, 1980). La croissance racinaire est réduite par le déficit hydrique qui inhibe la division cellulaire et la turgescence des cellules (Hsaio 1973). Chez les conifères, l'élongation des racines cesse lorsque le sol atteint un potentiel hydrique inférieur à -0.06 à -0.07 Mpa (Kaufman, 1968). De plus, les conditions dans le tunnel étaient très asséchantes malgré la ventilation forcée puisque la température dépassait 30°C le jour et l'humidité relative était en moyenne de 31 ± 12 %. Des conditions environnementales où l'humidité relative de l'air est maintenue entre 25 et 50% causent un déclin significatif

de la croissance racinaire de l'épinette noire (Darlington et al. 1997). Les températures au sol étaient très élevées le jour mais en deçà des températures pouvant causer des lésions, 44-50°C selon Larcher (2003).

Le  $\psi_{\text{préaube}}$  a pu se maintenir au même niveau que les témoins les 7 premier jours puis a décliné continuellement pour atteindre le niveau le plus bas après 14 jours de sécheresse. Le  $\psi_{\text{préaube}}$  des 45-110 et des 25-350A ont atteint des niveaux aussi bas que -2.1 et -2.3 Mpa. Des valeurs moyennes entre -0,8 et -1.1 Mpa n'entraîne pas de réduction de croissance mesurable chez *Pinus resinosa* (Becker et al. 1987). Généralement un potentiel hydrique entre -1 Mpa et -2 Mpa indique un stress hydrique modéré et un potentiel en dessous de -2 Mpa peut être fatal aux plants (Colombo et al. 2001). Le  $\psi_{\text{préaube}}$  est la mesure la plus indiquée et la plus stable pour mesurer le stress hydrique des plants et Landis (1989) considère des valeurs entre -1.0 et -2.5 Mpa comme un stress hydrique sévère.

L'analyse des mesures de potentiel hydrique ne supporte pas l'hypothèse que les 113-25 sont plus fragile aux stress hydriques. Au contraire, le  $\psi_{\text{préaube}}$  et  $\psi_{\text{mijour}}$  étaient plus élevés que les autres types de plants. La réaction aux stress hydrique des 113-25 est très similaire à celles des 67-50; leurs  $\psi_{\text{préaube}}$  et  $\psi_{\text{mijour}}$  étaient significativement moins bas (-1.7 Mpa) après 14 jours de sécheresse que celui des 45-110 et 25-350A (-2.1 et -2.3 Mpa respectivement).

Lamhamedi et al. (1997) attribuent des niveaux inférieurs de potentiel hydrique chez les gros plants à un système racinaire déficient, le TRC des racines étant nettement plus faible chez les plants de fortes dimensions (PFD, 15-700) comparativement aux petits (45-110) et moyens (45-340). Un autre élément noté par Lamhamedi et al. (1997) est la forte compacité de la masse racinaire dans la carotte de tourbe des gros plants. Dans notre expérience, la densité racinaire des 113-25 était la plus faible, 2,6 cc.cc<sup>-1</sup> comparativement à 7,0 pour les 25-350A. Il est reconnu que absorption de l'eau par le système racinaire est moins



Figures 4. (A-B) Moyenne de la photosynthèse nette (A-B) et de la conductance stomatique à la vapeur d'eau (C-D) des quatre types de plant qui n'ont pas été arrosés entre les jours 0 et 14 (Stress) ainsi que des plants témoins arrosés à tous les deux jours; n = 5. Les barres noires indiquent la période où les plants stressés n'ont pas été arrosés.

Tableau 4. Sommaire de l'ANOVA de la photosynthèse nette et de la conductance stomatique à la vapeur d'eau pour les mesures avant le traitement de stress hydrique (jour 0) et 11 jours après la fin du stress hydrique.

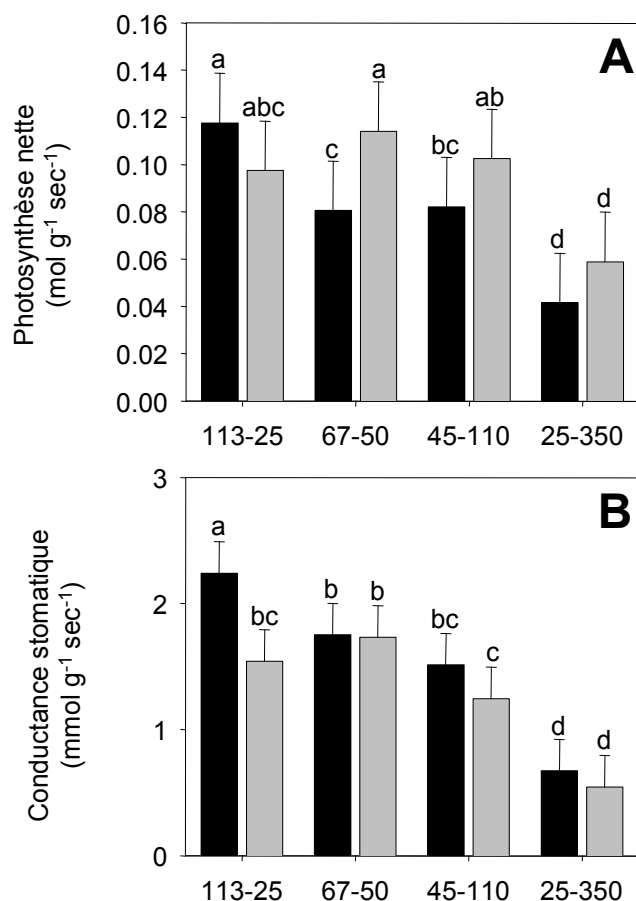
Source	Photosynthèse				Conductance	
	d.l. num.	d.l. dén.	F	Prob > F	F	Prob > F
Bloc (B)	4	4	0,57	0,7012	1,10	0,4638
Jour (J)	1	4	3,89	0,1199	4,31	0,1063
Réc. (R)	3	24	36,29	<b>&lt;0,0001</b>	37,00	<b>&lt;0,0001</b>
J x R	3	24	7,57	<b>0,001</b>	2,50	0,0834

efficace à de fortes densités racinaires (Baldwin et al. 1972). De plus le système racinaire des 113-25 est plus jeune et donc moins lignifié que les plants comme les 45-110 et 25-350A qui ont été produits sur trois ans.

Dans le cas des plants produits en récipients, les racines sont confinées à la carotte de tourbe et normalement lorsque la portion supérieure du sol s'assèche, les PFD ayant une carotte de tourbe plus longue devraient avoir accès à une source d'eau plus longtemps (Burdett 1990). La faible densité racinaire des 113-25 relativement aux autres types de plants signifie aussi que la carotte de tourbe peut contenir

relativement à la taille du plant une plus grande réserve d'eau comparativement aux autres types de plants. D'après Jutras et al. (2007), le statut hydrique des PFD d'épinette noire dépend de la tourbe qui entoure le système racinaire permettant de maintenir un potentiel hydrique moins négatif. South et Mitchell (2005) ont montré chez *Pinus palustris* qu'à un certain niveau, une trop forte densité racinaire réduisait la survie des semis plantés. Le rapport biomasse aérienne/ racinaire est nettement plus faible chez les 113-25 et 67-50 comparativement aux 45-110 et 23-350 ce qui pourrait expliquer un meilleur maintien du statut hydrique des plants. Un rapport élevé signifie que les racines sont peu



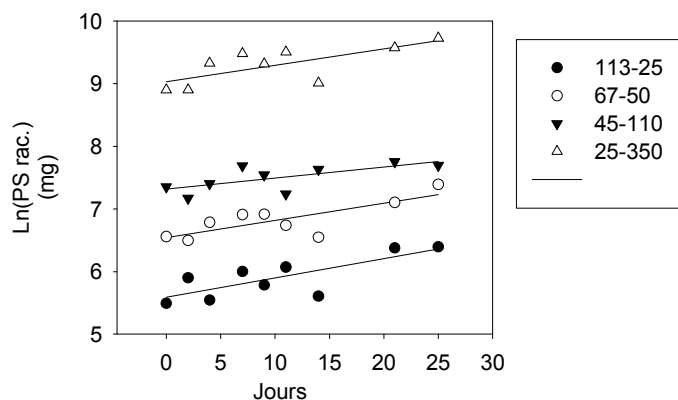


Figures 5. Moyenne de la photosynthèse nette (A) et de la conductance stomatique à la vapeur d'eau (B) des quatre types de plant mesurés avant le stress hydrique (■) et 11 jours après celui-ci (□). Les traits verticaux indiquent l'intervalle de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes sont significativement différentes à  $P \leq 0,05$  d'après le test de T de Student;  $n = 5$ .

abondantes p/r au feuillage et donc que les plants sont plus susceptibles de souffrir de la sécheresse. D'après [Bernier et al. \(1995\)](#), cette affirmation ne s'applique aux plants à racines nues mais pas aux plants cultivés en récipient; dans ce type de culture, les conditions de croissance ne sont pas limitées, ce qui favorise la prolifération racinaire. Par contre, la limitation serait peut être plus d'ordre physique. La croissance aérienne dans les petits récipients pourrait être moins limitée que celle des racines. Les valeurs du rapport racines:tige seraient un effet du type de récipient. Malgré un plus haut taux de photosynthèse, la croissance est similaire avec les PFD. Au moment où les plants cultivés en récipients sont plantés, le facteur limitant le transfert de l'eau survient à l'interface de la carotte et du sol ([Bernier et al. 1995](#)). À plus long terme après la plantation, le potentiel d'évitement de la sécheresse est relié à la vitesse que le semis est capable de produire de nouvelles racines qui s'étendent à l'extérieur de la carotte dans le sol environnant ([Bernier et al. 1995](#)). Dans notre expérience le taux relatif de

Tableau 5. Sommaire de l'ANOVA de la biomasse sèche des racines. Les données ont été transformées en Log naturel

Source	d.l. num.	d.l. dén.	F	Prob > F
Bloc (B)	4	4,027	2,29	0,2200
Trait. (Tr)	1	4,028	0,65	0,4641
Jour (J)	8	64,16	15,84	<b>&lt;0,0001</b>
J x Tr	8	64,16	1,80	0,0926
<i>J<sub>0</sub> x Tr</i>	1	57,7887	0,21	0,6471
<i>J<sub>2</sub> x Tr</i>	1	62,1159	0,87	0,3559
<i>J<sub>4</sub> x Tr</i>	1	57,7587	0,34	0,5634
<i>J<sub>7</sub> x Tr</i>	1	57,7587	0,07	0,7955
<i>J<sub>9</sub> x Tr</i>	1	57,7587	0,23	0,6342
<i>J<sub>11</sub> x Tr</i>	1	57,7587	0,09	0,7674
<i>J<sub>14</sub> x Tr</i>	1	57,7587	1,63	0,2065
<i>J<sub>21</sub> x Tr</i>	1	57,7587	6,41	<b>0,0141</b>
<i>J<sub>24</sub> x Tr</i>	1	57,7587	4,84	<b>0,0319</b>
Réc. (R)	3	215,3	1237,71	<b>&lt;0,0001</b>
<i>Petit vs grand</i>	1	166,8	1892,04	<b>&lt;0,0001</b>
<i>113 vs 67</i>	1	167,5	239,16	<b>&lt;0,0001</b>
<i>45 vs 25</i>	1	167,5	636,30	<b>&lt;0,0001</b>
Tr x R	3	215,3	1,50	0,2148
J x R	24	215,3	1,20	0,2447
J x Tr x R	24	215,3	0,71	0,8432



Figures 6. Croissance de la biomasse racinaire (transformation en Ln) des quatre types de plant témoin pendant les 25 jours de l'expérience.

croissance (TRC) des racines entre les 4 types de plants ne différait pas statistiquement.

L'analyse des mesures d'échange gazeux a mis en évidence des différences importantes entre les types de plants. Avant le traitement de stress hydrique, la conductance stomatique variait inversement avec la taille des plants ce qui résulte en un taux de photosynthèse nettement plus élevé chez les 113-25. Le traitement de stress hydrique a provoqué rapidement la fermeture graduelle des stomates. Par contre, le traitement a induit la fermeture complète des stomates des plants 25-350A après 4 jours de stress hydrique tandis que la conductance stomatique était positive chez les trois autres types de plants même après 9 jours de traitement.

Malgré un taux de transpiration plus élevé chez les petits plants, les 113-25 et les 67-50 ont conservé un potentiel hydrique pré-aube et mi-jour moins négatif que les 45-110 et 25-350A ce qui indique que dans une certaine mesure, les plants plus petits ont une meilleure capacité de se réhydrater la nuit jusqu'à un certain point. Les températures plus froides et l'humidité relative plus élevée la nuit pourrait jouer un rôle important dans ce mécanisme. Le maintien d'un potentiel hydrique plus élevé pourrait s'expliquer par la densité racinaire plus faible chez les 113-25 qui serait donc en contact avec une réserve d'eau dans la carotte de tourbe relativement plus abondante par rapport à la surface évaporative du feuillage. [Lamhamedi et al. \(1998\)](#) expliquent les échanges gazeux plus bas et un potentiel hydrique du xylème plus négatif par l'augmentation de la masse foliaire et un système racinaire très dense et compacte dans la carotte de tourbe. Une masse compacte de racine réduit l'absorption de l'eau et des nutriments ([Balwin et al. 1972](#)). De plus, des racines «jeunes» moins lignifiées sont plus perméable, ce qui améliore l'absorption de l'eau. Les résultats de cette expérience suggèrent que la plantation des PTPD ne semble pas constituer un risque plus grand en cas de sécheresse prolongée par rapport à l'utilisation de plants conventionnels de plus grandes dimensions.

Le récipient 126-25 qui a d'abord été utilisé à la pépinière de St-Modeste pour le bouturage a donc permis de tester rapidement la viabilité en plantation des plants produits dans une petite alvéole de 25cc. Suite aux résultats prometteurs des premiers essais de reboisement, un nouveau récipient a été développé, le 113-25. La forme de l'alvéole permet un meilleur remplissage et l'ergonomie générale permet une meilleure manipulation en pépinière et en plantation.

## RÉFÉRENCES

Baldwin, J.P., Tinker, P.B. et P.H. Nye 1972. Uptake of solutes by multiple root systems from soil II. The theoretical effects of rooting density and pattern on uptake of nutrients from soil. *Plant and Soil* 36: 693-708.

Becker, C.A., Mroz, G.D. et L.G. Fuller 1987. The effects of plant moisture stress on red pine (*Pinus resinosa*) seedling growth and establishment. *Can. J. For. Res.* 17: 813-820.

Bernier, P.Y., Lamhamedi, M.S. et D.G. Simpson 1995. Shoot: root ratio is of limited use in evaluating the quality of container conifer stock. *Tree Planters' Notes* 46(3): 102-106.

Burdett, A.N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Can. J. For. Res.* 20: 415-427.

Colombo, J., Sampson, P.H., Templeton, C.W.G., McDonough, T.C., Menes, P.A., DeYoe, D. et S.C. Grossnickle 2001. Chap. 16 : Assessment of nursery stock quality in Ontario. *Dans Regenerating the canadian forest: principles and practice for Ontario*. R.G. Wagner et S.J. Colombo (éditeurs). Markham, Ont.: Fitzhenry & Whiteside: 307-323.

Darlington, A.B., Halinska, A., Dat, J.F. et T.J. Blake 1997. Effects of increasing saturation vapour pressure deficit on growth and ABA levels in black spruce and jack pine. *Trees* 11: 223-228.

Duskey, M.G. et T.M. Ballard 1980. Resistance to water uptake by Douglas-fir seedlings in soils of different texture. *Can. J. For. Res.* 10: 530-534.

Grossnickle, S.C., 2000. *Ecophysiology of Northern Spruce species: The performance of planted seedlings*. NRC Research Press. Ottawa. 409 p.

Grossnickle, S.C 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests*. 30: 273-294.

- Grossnickle, S.C. et T.J. Blake 1987. Water relation patterns of bare-root and container jack pine and black spruce seedlings planted on boreal cut-over sites. *New Forests* 1(2): 101-116.
- Grossnickle, S.C. et R.S. Folk 1993. Stock quality assessment: forecasting survival of performance on a reforestation site. *Planters' Notes* 44(3): 113-121.
- Hébert, F., Gagnon, D. et D. Lord 2005. Production de plants d'épinette noire de petites dimensions (PPD): transfert technologique. UQAC. Chicoutimi. 53 p.
- Hébert, F., Boucher, J.-F., Bernier, P.Y. et D. Lord 2006. Growth response and water relations of 3-year-old planted black spruce and jack pine seedlings in site prepared lichen woodlands. *For. Ecol. Manage.* 223: 2236-236.
- Hsiao, T.C. 1973. Plant response to water stress. *Annual Review of Plant Physiol.* 24: 519-570.
- Jobidon, R., Charette, L., et P.Y. Bernier 1998. Initial size and competing vegetation effects on water stress and growth of *Picea mariana* (Mill.) BSP seedlings planted in three different environments. *For. Ecol. Manage.* 103: 293-305.
- Jutras, S., Thiffault, N. et A.D. Munson 2007. Comparing large bareroot and container stock: water stress as influenced by peat and soil water availability. *Tree Planters' Notes* 52(1): 15-18.
- Kaufmann, M.R. 1968. Water relation of pine seedlings in relation to root and shoot growth. *Plant Physiol.* 43: 281-288.
- Kirk, 1982. *Experimental design*. Second Edition. Wadsworth, Inc., Belmont, Ca. 911 p.
- Lamhamedi, M.S. et P.Y. Bernier 1994. Ecophysiology and field performance of black spruce (*Picea mariana*): a review. *Ann. Sci. For.* 51: 529-551.
- Lamhamedi, M.S, Bernier, P.Y. et C. Hébert 1997. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. *New Forests* 13: 209-223.
- Lamhamedi, M.S., Bernier, P.Y., Hébert, C. et R. Jobidon 1998. Physiological and growth responses of three sizes of containerized *Picea mariana* seedlings outplanted with and without vegetation control. *For. Ecol. Manage* 110: 12-23.
- Landis. T.D. 1989. Chap. 2. Irrigation and water management. *Dans The container tree nursery manual*. Volume four: seedling nutrition and irrigation. T.D. Landis, R. W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett (éditeurs). USDA For. Serv. Agric. Handbook 674: 102 pp.
- Larcher, W. 2003. *Physiological plant ecology – Ecophysiology and stress physiology of functional groups*. 4<sup>th</sup> Edition, Springer, Berlin. 513 p.
- Montgomery, D.C. 1991. *Design and analysis of experiments*. Third Edition. John Wiley & Sons, New York. 649 p.
- Poorter, H., et C. Lewis 1986. Testing differences in relative growth rate a method avoiding curve fitting and pairing. *Physiol. Plant.* 67: 223-226.



SAS Institute Inc. 2007. JMP Statistics and Graphics  
Guide, Release 7. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

South, D.B. et R.G. Mitchell 2005. A root-bound index for  
container-grown pines. *Dans* The thin green line - A  
symposium on the state-of-the-art in reforestation, july  
26-28, Thunder-Bay, Ont. Canada. Compiled by S.J.  
Colombo: 92-97.

Walsh, D., Allaire, J. et D. Lord 2011. Survie et croissance  
de mini-plants d'épinette noir reboisés en forêt  
boréale : Bilan de 10 ans en plantation. [http://dsf.uqac.  
ca/boreale/](http://dsf.uqac.ca/boreale/).



